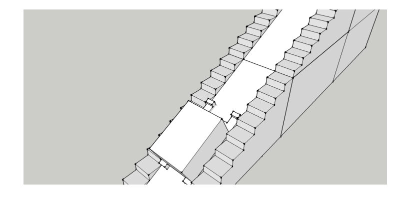


De Hérodote à Houdin



Yves Maneglia

Versions

Cet ouvrage bien que très avancé peut être amené à évoluer dans le temps, ne serait-ce que pour corriger des erreurs qui pourraient y être présentes. Ceci est la version 6.2 du 04/11/2015. Ce document peut être téléchargé ici.

Introduction

Cet ouvrage s'intéresse à la façon de construire une pyramide élevée telle que l'a été la pyramide de Khéops. De toutes les pyramides connues, y compris les pyramides aztèques, c'est la plus aboutie, tout le monde s'accordant à dire qu'elle aurait bénéficié des meilleures techniques de construction des bâtisseurs égyptiens de l'époque il y a plus de 4500 ans. La transmission du savoir des bâtisseurs ayant été perdue il y a au moins 2000 ans, on ne sait pas vraiment comment a été construite la pyramide de Khéops et de nombreuses théories ont vu le jour sans qu'aucune d'entre elles n'ait pu s'affirmer. Les autorités égyptiennes y sont peut être actuellement pour quelque chose, car en voulant préserver ce précieux héritage et peut être entretenir le mystère de Khéops, les études scientifiques sur place sont rares du fait de la difficulté d'obtenir les autorisations nécessaires. Si l'on

écarte les problématiques de taillage et d'acheminement des pierres sur place, il y a deux écoles, celle du levage et celle du tractage. Dans la première école on privilégie les dispositifs de levage de blocs, tandis que dans la deuxième, on préfère la théorie des rampes qui suppose que les blocs auraient été transportés en hauteur par halage humain sur des chariots sans roue. Les principales théories seront évoquées brièvement afin de voir les principaux problèmes connus qui en découlent. Afin de tordre le cou aux idées reçues, et se faire sa propre opinion, certains problèmes seront étudiés par des calculs simples, accessibles à tout bachelier, ce qui reste la façon la plus objective d'appréhender le sujet. La ou les solutions trouvées ne reflétant pas forcément la réalité telle qu'elle a été mais telle qu'elle aurait pu être dans le meilleur des cas. C'est pour cela qu'il faut s'appuyer sur les observations faites des pyramides, dont la pyramide de Khéops, afin de voir ce qui est crédible ou peut donner lieu à d'autres hypothèses ou des compromis. Le but de cet ouvrage n'est pas d'étudier l'agencement interne de la pyramide de Khéops, même si l'on verra que parfois on sera amenés à comparer les

niveaux intérieurs et extérieurs de cet ouvrage.

Evolution des tombes

La géométrie des tombes égyptiennes a beaucoup changé au cours des siècles et les techniques de construction associées aussi. Il est important de connaître leur histoire car cela peut nous donner des indications sur le rapport qu'avaient les égyptiens avec la mort et la façon dont ils auraient pu construire des pyramides à faces lisses. Au début, les tombes étaient très discrètes, de simples puits qu'il suffisait de creuser, puis ces puits ont contenu une chambre funéraire et ont été recouverts par une construction aérienne rectangulaire ou carrée, en brique puis en pierre et que l'on appelle mastaba. Par la suite ces mastabas sont devenus plus imposants, symboles de la puissance du défunt, et ont été recouverts pas des massifs empilés pour aller toujours plus haut et constituer des pyramides à degrés

[1]. La première d'entre elles serait la pyramide de Djoser, haute de 62m, qui a été agrandie 2 fois, passant successivement de 1 à 4 puis 6 niveaux avec plusieurs puits dont un très large d'une trentaine de mètres de profondeur, au fond duquel se trouve un bloc de granite d'environ 3.5 tonnes. Puis les puits qui menaient aux chambres souterraines semblent avoir été remplacés par des galeries descendantes, et au fil des évolutions, ces chambres se sont rapprochées de la surface et même bien au-delà, sous des constructions qui sont devenues des pyramides à faces lisses. La pyramide de Khéops, étant devenue la plus célèbre, de par ses dimensions pharaoniques, une pyramide à base carrée de 230m de côté, 146m de hauteur et constituée selon les estimations, d'environ 2 millions de blocs de 2 à 60T. A savoir qu'il existe deux pyramides particulières, la pyramide de Meidoum qui est à la fois une pyramide à degrés et une pyramide à faces lisses, et la pyramide de snéfrou qui est une pyramide rhomboïdale. La plupart de ces pyramides ayant été érigées sur le plateau de Gizeh, les autres à Sakkara, Zaouiet-el-Arian, Meidoum et Dahchour, tout le monde s'acccorde à dire que c'est sur place

que provenaient la plupart des blocs, et que les autres pierres comme le granite ou les poutres étaient acheminées par bateaux circulant sur des canaux. Après l'âge d'or des pyramides, celles-ci sont devenues moins imposantes pour disparaître au profit d'hypogées, des constructions souterraines creusées dans la roche très décorées et tenues cachées des pilleurs de tombe, comme le tombeau de Toutânkhamon. Une partie du mystère de la pyramide de Khéops résidant dans le fait qu'elle a été violée et pillée plusieurs fois il y a longtemps, de sorte que les explorateurs occidentaux n'ont rien trouvé d'autre qu'un sarcophage vide. On ne sait pas vraiment à quoi ressemblait Khéops et on cherche encore comme Houdin une hypothétique chambre cachée qui recèlerait des trésors comparables à ceux de Toutânkhamon.

[1] A la même époque chez les sumériens, à l'est de l'égypte, il y avait des temples similaires à base carrée (en général de 30 à 60m de hauteur et jusqu'à une centaine de mètres de côté) mais construits en briques uniquement et non en pierre. Les sumériens appelaient ces

constructions comparables à des montagnes des Ziggurats, sur lesquelles se trouvait un temple.

Les machines de levage

Les théories expliquant la construction des pyramides par l'utilisation de "machines" de levage sont les plus anciennes, elles sont apparues 5 siècles avant J.C. par Hérodote qui avait interrogé les prêtres égyptiens de l'époque par le biais de traducteurs dont les propos peuvent contenir des inexactitudes: “ *Voici comment fut construite cette pyramide: d'abord une succession de degrés, que certains appellent krossai (krovssa") et d'autres bômides (bwmivda"); quand la pyramide fut construite sous cette forme, on éleva le reste des pierres à l'aide de machines faites de morceaux de bois courts; on les élevait de terre à la première assise des degrés; Quand une pierre y était parvenue, on la mettait dans une autre machine qui était sur cette première assise ; de là on la montait par le moyen d'une autre machine,*

car il y en avait autant que d'assises ". Plus récemment, les machines de levage sont devenues moins populaires au profit de la théorie des rampes, ce qui reste paradoxal car de nos jours, pour construire des bâtiments élevés on utilise des grues pour monter des charges rapportées sur le chantier par des véhicules empruntant parfois une rampe d'accès. Alors pourquoi les égyptiens auraient-ils procédé différemment de nous qui semblons avoir adopté les meilleures solutions? Il peut y avoir plusieurs raisons à cela. La première c'est que si des machines étaient effectivement présentes par le passé, ce sont les progrès techniques qui ont fait qu'elles ont finalement remplacé les animaux et les hommes qui sont devenus perplexes devant l'immensité des travaux réalisés par les égyptiens de l'époque (à titre d'exemple qui laisse songeur, c'est celui d'une dizaine de travailleurs égyptiens, qui de nos jours, utilisant uniquement des leviers et des cales, ont mis 45 minutes pour lever un bloc à environ 1m de hauteur). La seconde raison pourrait être que peu de gens sont séduits par une solution technique trop spécifique à des machines qui auraient peu de chance d'avoir été imaginées par les égyptiens. Il

faudrait retrouver une de ces machines ou découvrir sa descrition sur des écrits ou dessins de l'époque. Les machines couramment envisagées sont à base de leviers ou de balanciers, de treuils, d'engrenages, utilisant les ressources de l'époque: le bois, des cordes reliées ou non à des poulies fixes et peut-être des pièces métalliques en cuivre. Les poulies mobiles, le fer ou la roue étant considérées comme inexistantes à l'époque alors que pourtant, la roue était déjà utilisée par les chars Sumériens à l'époque de Khéops, 3000 ans avant J.C.). Ces machines peuvent être classées en deux catégories selon leur usage, celles qui fonctionnent par gradins et celles qui fonctionnent sur plusieurs niveaux. La machine à gradins la plus connue reste la machine d'Hérodote tandis que pour la machine par niveaux elle ressemblerait au "chadouf" égyptien. Dans le cas de la pyramide de Khéops il y a plus de 200 niveaux de blocs de 70cm de hauteur moyenne, et donc pour être efficaces, il faudrait imaginer des "machines" qui fonctionneraient sur plusieurs niveaux et non pas par gradin. C'est une première indication sur ces "machines" qui auraient donc dû être soit imposantes comme les grues

actuelles, ce qui est difficile à réaliser, ou alors très nombreuses mais construites en bois, une ressource considérée comme rare à l'époque.

La théorie des rampes

Les théories envisageant des rampes sont devenues très populaires en dépit des divers problèmes que l'on peut rencontrer dans chacun des cas imaginés jusqu'à présent. La théorie des rampes semble prendre naissance avec F. Pétrie qui a retrouvé des vestiges de rampes en briques crues aux alentours de la pyramide de Meïdoum. Cela dit, il est difficile de conclure sur ces rampes qui auraient pu être des rampes d'accès au chantier sur une hauteur qui reste à retrouver. Les rampes peuvent être frontales, hélicoïdales, en tranchée, en zig-zag ou diagonales, internes ou tunnel, et latérales. Une rampe frontale allant jusqu'au sommet de la pyramide nécessiterait un volume trop important proche de celui de la pyramide à construire, et qu'il faudrait éliminer par la suite. Il en est de même dans le cas d'une rampe

hélicoïdale qui envelopperait toute la construction. Les rampes en tranchée et les rampes tunnel, bien qu'intégrées dans la construction, souffrent de gros problèmes liés à la difficulté de circuler dans un milieu étroit souffrant d'un manque de lumière et d'aération. Il reste les rampes latérales qui feraient partie de l'édifice, mais semblent difficiles à mettre en oeuvre. Les rampes envisagées dans la plupart des cas sont en pente douce, inférieure à 10 degrés, ce qui implique dans le cas de la pyramide de Khéops, des rampes pouvant atteindre le kilomètre. Une rampe en pente douce ne peut être envisagée que pour une hauteur raisonnable à définir. Les théories qui envisageraient des pentes élevées sont celles qui privilégient un passage de charges par les flancs ([1]?[8]) à condition de s'appuyer sur des blocs de pierre lisses ou un revêtement qui recouvrirait les blocs au fur et à mesure de la construction. Certains auteurs ([1]-[9]-[10]) ont aussi imaginés des traîneaux qui circuleraient sur des rails et non plus sur le sol ou sur des rouleaux.

[1] Franz Lohner [2] Louis Albertelli [3] Bernard Capet [4] Vincent

Elissagaray [5] Bernd Motl [6] Patrick Sautereau [7] Elena Beatriz Piedra [8] Charles Rigano [9] J.P. Houdin

Rampe frontale

Des vestiges de rampe frontale ayant été observés aux abords de la pyramide rhomboïdale de Meydoum, il a été accepté depuis F. Petrie, l'idée de rampe frontale pour bâtir les pyramides. De nos jours encore, on continue d'envisager une rampe frontale pour construire la pyramide de Khéops. Mais pourquoi donc vouloir construire une rampe avec un volume si important pour la démonter ensuite? Ne vaut-il pas mieux utiliser une rampe dont le volume fera partie intégrante de la pyramide comme chez les sumériens ? Dans le cas de la rampe frontale semi-extérieure envisagée par J.P. Houdin pour la grande pyramide de Khéops, cette rampe de 325m de long, 43 mètres de haut et 7° d'inclinaison, peut tenir presque entièrement dans la diagonale de la grande pyramide de base carrée de 230m (325=230sqrt(2))

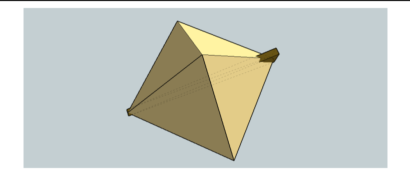


figure1: Rampe de J.P. Houdin contenue dans le volume de la pyramide

Rampe diagonale

La rampe interne diagonale a déjà été introduite dans le paragraphe "rampe frontale". Cette rampe avait été étudiée et retenue par J. Rouseau qu'il qualifiait de rampe tunnel en zigzag. Si on revient sur la théorie de J.P. Houdin qui affirme que des rampes internes latérales ont été utilisées dans la pyramide de Khéops et que l'on s'intéresse au nombre de changements de direction, pour une même hauteur, il y aurait 21 tronçons chez Houdin contre environ 14 pour les rampes diagonales. Qui dit changements de directions supplémentaires dit manipulations de blocs en plus et perte de temps.

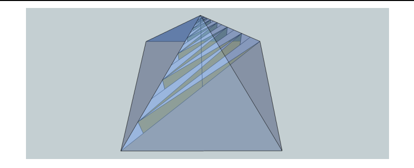


figure1: Rampes internes diagonales ou tunnel en zigzag

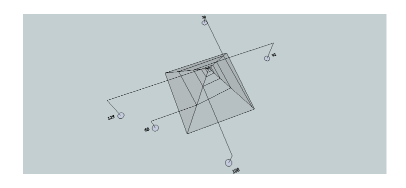


figure2: Rampes de Houdin

Les contrepoids

Du fait de la difficulté de soulever des charges ou de les tirer le long de pentes élevées telles que les flancs, un certain nombre d'auteurs ont imaginé des systèmes de contrepoids pour soulager les travailleurs ou limiter leur nombre. Dans le cas des "machines" de levage, les solutions envisagées sont généralement calquées sur des appareils à bascule, tandis que dans le cas du tractage, ce sont les charges et les contrepoids qui auraient circulé le long des flancs [1]?[3]-[6]-[7]. Certains auteurs ont pensé à des contrepoids de type humain [2]-[6]-[7], tandis que d'autres ont imaginé que les contrepoids auraient pu circuler à l'intérieur de la pyramide, dans un puits [3] ou dans la grande galerie de Khéops [4]-[5]. Cela aurait nécessité des cordes longues de plusieurs centaines de mètres! Les blocs de la pyramide de Khéops pouvant être très lourds comme les poutres de la chambre du roi, pour faire gravir

une poutre de 60T sur une pente de 26°, il aurait fallu théoriquement le poids d'un millier de travailleurs ce qui est énorme! Basé sur l'idée d'effort fractionné, il aurait été possible d'utiliser un contrepoids fait de 18 blocs de 3 tonnes montés chacun par la force ou le poids de 45 hommes. Une théorie intéressante du fait de son principe reste celle du monte-charge incliné à contrepoids humain [6] qui est une sorte d'ascenseur incliné ou de funiculaire.

[1] Bernard Capet [2] Bernd Motl [3] Vincent Elissagaray [4] Elena Beatriz Piedra [5] Jean-Pierre Houdin [6] Patrick Sautereau [7] Louis Albertelli

Rampe assistée par un puits

Ce paragraphe introduit la notion de rampe assistée par un puits. Ce dispositif a été envisagé par V. Ellisagaray qu'il qualifie de rampe linéaire à nacelle-contrepoids. Le schéma de principe est résumé dans la figure suivante: un chariot transportant une charge aborde une rampe, ce chariot est relié par des cordes au sommet de la pente à un plateau. Sur ce dernier, des hommes ou des animaux montent avec éventuellement des sacs de sable ou du matériel et constituent le contrepoids qui, si sa valeur est suffisante peut permettre au plateau de descendre du puits et au chariot de gravir la pente. Par exemple, pour une pente à 26° et une charge de poids P, il suffirait d'un contrepoids de 0.88P (voir la théorie dans le paragraphe "rampe douce, normale, forte"). En principe si l'on utilisait un contrepoids de type

humain ou animal, on pourrait monter une charge sans effort. Dans la pratique, à moins d'envisager un énorme plateau ou alors de pratiquer l'effort fractionné, le contrepoids ne peut rester qu'une aide pour soulager les travailleurs dont la tâche serait de tirer ou pousser la charge, d'où la notion de rampe assistée.

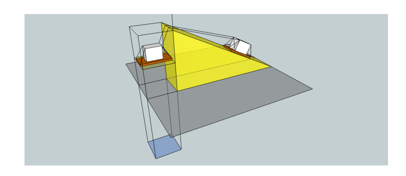


figure1: Schéma de principe de la rampe assistée par un puits

Rampe douce, normale, forte

Ce paragraphe est important, car il va montrer que contrairement aux idées reçues, pour monter de manière efficace une masse à une hauteur donnée en utilisant une rampe, une rampe en pente douce (7°) ou normale (11°) n'est pas toujours avantageuse par rapport à une rampe en pente forte (26°). Ce résultat peut paraître surprenant au premier abord quand on sait qu'il est plus difficile pour une personne seule de tirer une charge lorsque la pente devient trop importante. Mais en ce qui concerne la construction des pyramides, comme il s'agit de monter un grand nombre de charges avec un grand nombre de travailleurs, c'est la répartition des ressouces qui importe pour être le plus efficace possible.

Le raisonnement est le suivant: on peut montrer à partir de la deuxième loi de Newton que dans le cas d'un mouvement uniforme avec frottement le long d'une pente, la force nécessaire au déplacement d'une masse (un chariot chargé d'un bloc de pierre) est $F(a,u)=P(sina+ucosa)$, u étant le coefficient de frottement, P le poids, et a l'angle de la pente. Pour monter cette masse à une hauteur h, il faut la tirer sur une rampe de longueur $d(a)=h/sina$. Plus l'angle augmente, plus la force à appliquer est grande et il faudra un plus grand nombre de travailleurs pour tirer la masse avec le même effort et la même vitesse. En revanche, la distance de traction sera réduite. Ainsi, pour un nombre de travailleurs fixé, la question légitime qui se pose est de savoir comment utiliser ces travailleurs pour monter le plus rapidement possible des masses à une hauteur donnée. Vaut-il mieux tirer plus de masses sur une une distance plus longue, cas de l'angle a, ou moins de masses sur une distance plus courte avec possibilité de faire des allers-retours, cas de l'angle b ? ($b>a$).

on a:

$d(a)=h/sina$ et $F(a,u)=P(sina+ucosa)$

d(b)=h/sinb et F(b,u)=P(sinb+ucosb)

Le rapport des forces entre les cas b et a, c'est : F(b,u)/F(a,u)=[sinb+ucosb]/[sina+ucosa]. C'est à la fois, le rapport du nombre de masses tirées par trajet, n(a)/n(b), mais aussi le rapport du nombre de travailleurs utilisés dans les 2 cas pour tirer une masse avec la même vitesse et le même effort par travailleur Comme b>a et que les angles sont compris entre 0 et 90°, ce rapport est plus grand que 1.

On a donc pour un trajet:

n(b)=n(a)F(a,u)/F(b,u)

n(b)=n(a)[sina+ucosa]/[sinb+ucosb]

Le rapport des distances entre les cas b et a, c'est : d(b)/d(a)=sina/sinb.

Comme b>a et que les angles sont compris entre 0 et 90°, ce rapport est inférieur à 1. Ce qui veut dire que pour r trajets de a on aura parcouru r*d(a)/d(b) = r*sinb/sina trajets de b,

Au final, on aura tiré:

r*n(a) masses dans le cas a

r*n(b)*d(b)/d(a)=r*n(a)*z masses dans le cas b

avec $z = [\sin b/\sin a][\sin a+u\cos a]/[\sin b+u\cos b]$

Pour savoir quel cas est avantageux, il convient d'étudier z, le produit des rapports des forces et des distances. Ainsi, si z est plus grand que 1 alors on aura monté plus de masses avec la pente forte. La résolution de l'inégalité $z>1$ montre que $z>1$ si $\tan b>\tan a$, ce qui est toujours le cas si $b>a$ et b compris entre 0 et 90 degrés. C'est un résultat indépendant des forces de frottement et on peut donc conclure, que si on a les ressources suffisantes pour monter des masses, et que plusieurs aller-retours sont nécessaires, alors plus forte est la pente de la rampe, plus vite on aura monté les charges. Le cas particulier étant le cas où il n'y a pas de frottement ($u=0$), et dans ce cas le résultat ne dépend plus des angles a et b car z devient égal à 1.

Cas concret, comparaison des pentes $a=7°$ et $b=26°$ dans le cas du tractage de blocs sur des chariots: Le rapport des forces (ou des travailleurs), c'est $F(26°,0.5)/F(7°,0.5)=1.43$. Le rapport des distances, c'est $\sin(7)/\sin(26)=1/3.6$. Et $z=3.6/1.43=2.5$ Ainsi si, l'on dispose de 1430 travailleurs, et qu'il faille 100 travailleurs pour monter un bloc de 5T sur une rampe de 7°, alors

en 10 aller-retour on pourra monter 143 blocs de 5T soit 715T. Dans le cas de la rampe de 26°, il faudra 10 groupes de 143 travailleurs pour monter 50T par allers-retours, et comme on aura le temps de faire 36 trajets (10*3.6), on aura monté au final 1800T (50*36), soit 2.5 fois plus. Notez que l'on a pris un coefficient de frottement de 0.5 qui est réaliste, car c'est celui du bois sur de la pierre à sec. On peut difficilement imaginer avoir u=0.1 (au mieux u=0.3), mais même dans ce cas improbable, z=3.6/ 2.4=1.5 ce qui représente un gain de masse encore non négligeable.

Le cas extrême ou b=90° ne correspondant pas vraiment à une rampe, il sera abordé dans le paragraphe "Les puits". Toujours est-il que nous venons de prouver qu'il serait bien plus efficace d'utiliser des rampes fortes plutôt que des rampes douces. Un problème subsiste cependant, comment mettre en pratique cette théorie? En effet, ceux qui ont gravi la grande galerie de la pyramide de Khéops savent combien il est difficile de progresser sur une pente à 26°, voire plus importante. Il faut alors envisager deux possibilités, soit les travailleurs

ne suivent pas la pente, ce qui limite la distance de traction car il faudrait des cordes très longues, soit ils suivent la pente et il faut alors la présence d'escaliers de part et d'autre de la rampe pour pouvoir tracter la charge. La pente de nos escaliers actuels étant d'environ 25°, nous y circulons aisément, en revanche pour des pentes plus importantes, l'escalier deviendra à son tour impraticable pour pouvoir tirer correctement les charges. On s'aperçoit alors que si l'on souhaite vraiment utiliser des rampes pour construire une pyramide, il faut faire des compromis.

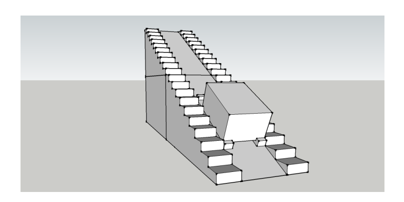


figure1: rampe à 26° avec escaliers latéraux

Les sumériens qui connaissaient la roue dès 3000 ans avant J.C. avaient l'habitude de faire des constructions

imposantes en briques appellées ziggurat et dotées de plusieurs rampes d'accès en forte pente avec escaliers faisant partie intégrante de l'édifice, ainsi que des façades à encoches. Les égyptiens s'en sont peut être inspirés pour leur propres édifices en pierres, mais cette fois en cachant les rampes dans la construction.



figure2: Ziggurat sumérien de Ur, partie supérieure du temple manquante

Il est intéressant de voir en comparant les 2 figures, que les escaliers de ce site sumérien, qui font partie intégrante de l'édifice, ont une pente forte et non faible.

Les puits

L'utilisation de puits dans les tombes égyptiennes est fréquent voire systématique, c'est une des raisons pour laquelle il faut envisager les puits comme un possible passage des charges levées ou des contrepoids. Dans le cas des mastabas, moins hauts que les pyramides (une dizaine de mètres de hauteur) avec des pierres souvent moins lourdes, on observe plusieurs choses: des murs inclinés (entre 70 et 90°), un puits et parfois des fausses portes proches des murs qui font penser à des puits semi-ouverts à 3 côtés. Si on reprend l'étude réalisée dans le paragraphe "Rampe douce, normale, forte", le puits c'est le cas extrême pour lequel l'angle b=90°. Dans ce cas précis, la fonction z = [1/sina][sina+u-cosa] = 1+u/tana. Il est intéressant de noter que u=tana représente la condition d'équilibre d'un solide sur une pente; quelle que soit la valeur de l'angle $a<b$, $z>1$, ce qui signifie que le

puits, c'est le cas le plus favorable rencontré en terme d'efficacité par travailleur. Par exemple, si l'on compare un puits à une pente avec a=7°, alors avec un coefficient u de 0.5, le rapport z=5, c'est-à-dire que l'on monte 5 fois plus rapidement du poids avec le puits. **C'est pourquoi, il serait logique de se dire que les pierres des massifs auraient été levées le long des faces ou par des puits et qu'il en serait de même pour les pyramides.** Dans le cas de la pyramide de Khéops, ce qui reste surprenant, c'est que le seul auteur à ma connaissance qui ait envisagé un puits pour hisser des blocs de pierre est P. C. Sundt (2010) qui a imaginé un ascenseur actionné par la force humaine qui partirait du niveau de la chambre du roi (45m de hauteur) en direction du sommet. Mais cet auteur, qui affirme que cette méthode est plus efficace et plus rapide que les rampes, pense que 70% du volume de la pyramide aurait été construit grâce à la théorie des rampes. Dans le cas de la pyramide de Khéops, la hauteur de levage étant importante (146m), envisager un puits unique d'une centaine de mètres de hauteur n'est pas réaliste. C'est pour cela qu'il faut considérer maintenant de lever des

charges en plusieurs fois, c'est-à-dire en utilisant plusieurs puits voire des puits semi-ouverts (à 3 côtés) le long de massifs constituant différents niveaux de la pyramide à définir. **Ce qui revient à dire que pour constuire une pyramide élevée telle que la pyramide de Khéops, il faut d'abord réaliser une pyramide à degrés et fractionner les efforts pour soulever les charges le long des faces.** C'est une conclusion logique et qui avait déjà été retenue par des théoriciens comme G. Dormion, inspirés par l'histoire de l'évolution des tombeaux égyptiens, dans laquelle les pyramides à degrés ont précédé les pyramides à faces lisses.

Micro-gravimetrie

Les mesures de microgravimétrie EDF (1980) ont été rendues populaires grâce à J.P. Houdin (2007) qui justifie l'existence de ses rampes entourrantes internes ou tunnel à partir de ces mesures et des simulations thermiques de DASSAULT (2008). Nous allons voir ici, le petit détail qui fait que ces mesures ne constituent pas une justification de sa théorie. Un dessin valant mieux qu'une grande explication vous trouverez en figure1, le résultat des mesures de micro-gravimétrie vu de dessus, dans lequel on peut voir, que les rampes internes latérales constituent des carrées inclinés par rapport à la base de la pyramide, tandis que les résultats de mesure montrent bien des zones carrés parallèles à la base ce qui on le verra deviendra **un moyen parmi d'autres de trouver les hauteurs des massifs cachés de**

la pyramide de Khéops. Cela dit, les résultats de mesures étant ce qu'il sont, il faudrait sans doute effectuer d'autres mesures, plus précises cette fois.

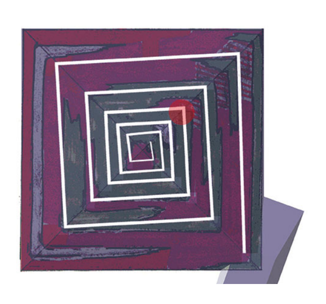


figure1: Mesures de micro-gravimétrie (rouge=forte densité, vert=faible densité)

En ce qui concerne les simulations thermiques, ces carrés inclinés par rapport à la base de la pyramide sont un détail qui n'a pas dû échapper aux ingénieurs de DASSAULT, et c'est peut être pour cela qu'ils n'ont pas montré leurs résultats par une vue de dessus comme montré ci-après.

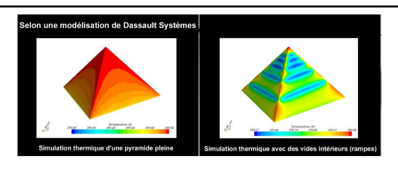


figure2: Simulations thermiques sans et avec rampes

Que peut on vraiment comprendre des mesures de micro-gravimétrie? Déjà qu'elles peuvent s'expliquer à partir des mesures de la taille des blocs réalisées par F. Petrie (1883). Pour s'en rendre compte, une comparaison de ces 2 types de mesures est faite dans la figure suivante, figure dans laquelle les mesures de F. Petrie représentées à droite, n'avaient été effectuées que dans le coin Nord-Est seulement mais ont été symétrisées dans les 4 directions, ce qui reste une hypothèse raisonnable, l'empilement des blocs n'ayant pu se faire que niveau par niveau et non pas de manière chaotique, ce qui a été confirmé d'une certaine manière par les mesures du coin Sud-Ouest par G. Goyon. On peut ainsi remarquer qu'il existe une corrélation entre les mesures de densité et la taille des blocs utilisés. Cela

s'explique par le fait, que les différences de densité mesurées doivent correspondre avec le nombre d'interstices présents entre blocs, car si les blocs sont petits, ils sont plus nombreux, de même que les interstices entre eux et il y a potentiellement plus de vides présents, et donc une densité mesurée plus faible. De la même manière, si les blocs sont plus gros c'est le contraire qui se passe et la densité mesurée devient plus forte. On peut donc en conclure que les mesures de micro-gravimétrie ne sont pas suffisantes pour prouver la théorie de J.P. Houdin.

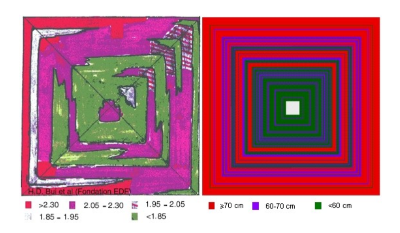


figure3: Comparaison mesures micro-gravimétrie et mesures taille des blocs

Exploitation des mesures de F. Petrie

Les mesures de F. Pétrie sur la taille des blocs utilisés dans le cas de la pyramide de Khéops vont nous permettre de différencier les différents niveaux de construction. La figure 1 suivante montre le résultat de ses mesures. Chaque mesure correspond à l'un des 205 gradins de la pyramide de Khéops, sur une hauteur totale de 146m avec une hauteur moyenne de bloc de 70cm. Cette figure montre qu'il y a une nette tendance à avoir des maximums suivis d'une décroissance jusqu'à un minimum précédant le maximum suivant. **Cette transition abrupte d'un minimum à un maximum pourrait signifier la présence d'un des niveaux d'une pyramide à degrés.**

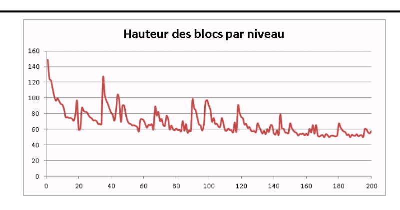


figure1: Mesures de F. Pétrie, taille des blocs par gradin

Des mesures de F. Pétrie, il est en premier lieu difficile de choisir tous ces niveaux car il y a de nombreux pics de taille variable, quelques grands maximums et beaucoup d'autres plus petits. Ce qui permet de choisir au mieux ces niveaux, ce sont les maximums principaux qui, on le constate, suivent la tendance générale de décroissance de la taille des blocs avec l'augmentation du nombre de gradin (de 1m45 à 52cm). C'est l'objet des résultats des figures 2 à 4 et l'on peut ainsi trouver **7 niveaux principaux situés à 0, 30, 70, 90, 106, 126, 146m de hauteur et constater sur la figure 4 une décroissance linéaire de la hauteur des blocs en fonction de la hauteur des niveaux principaux (pente -0.7).**

On ne retrouve cependant pas dans les niveaux principaux les niveaux de la chambre de la reine et du roi (21m et 43m), mais des maximums secondaires proches à 18m et 38m.

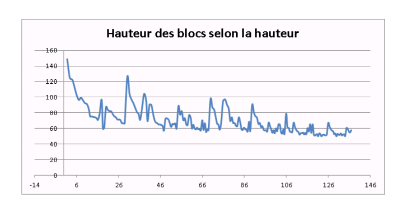


figure2: Mesures rapportées à la hauteur de la pyramide

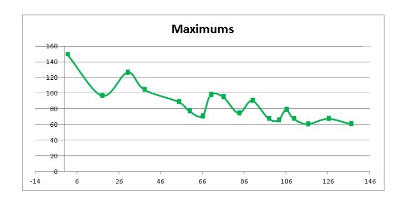


figure3: Maximums des la figure 2

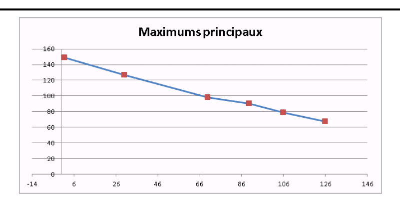


figure4: Maximums principaux

Les figures5, 6 et 7 représentent la pyramide de Khéops telle qu'elle aurait pu être avant recouvrement. Dans la figure5 sont représentés tous les maximums, principaux et secondaires, dans les figures6 et 7, ne sont représentés que les maximums principaux qui pourraient correspondre à un empilement de massifs.

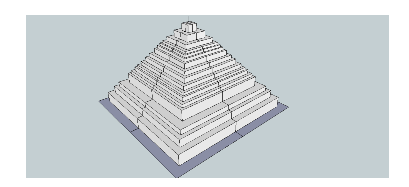


figure5: Représentation des niveaux des maximums

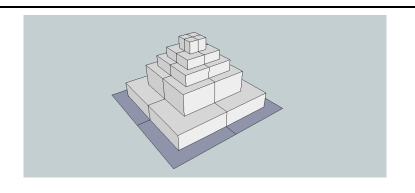


figure6: Représentation des niveaux des maximums principaux

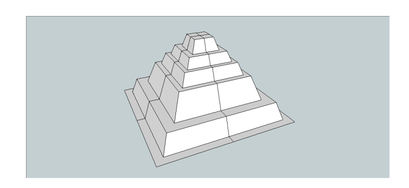


figure7: Niveaux principaux avec une pente à 70° (70° comme dans la pyramide de Meidoum)

Enfin la figure8 compare les mesures de micro-gravimétrie EDF avec les maximums principaux de la figure6 (vue de dessus cette fois) et permet de voir qu'il existe une corrélation entre les mesures d'EDF et celles de F. Pétrie.

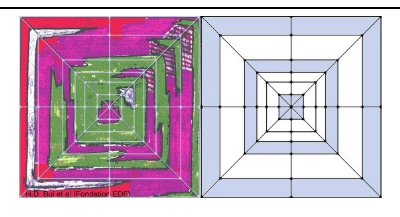


figure8: Comparaison des mesures de micro-gravimétrie et des maximums principaux

L'exploitation des mesures de F. Pétrie précédente n'a pas pris en compte les maximums secondaires et en particulier ceux qui sont si proches qu'ils ne sont séparés que par un minimum (voir sur la figure2). **On peut par exemple distinguer 3 points singuliers**: 18, 38, 54 mètres, on ne sait pas exactement ce qu'il se passe à ces hauteurs si ce n'est que cela doit avoir un rapport avec la géométrie intérieure de la pyramide. En effet, les deux premiers points correspondant à peu de chose près à la hauteur des chambres de la reine et du roi. En prenant en compte cette fois les points singuliers et en observant les mesures de microgravimétrie, les niveaux de construction de la pyramide à degrés

on ne retient au final que les niveaux suivants: **0, 18, 30, 38, 54, 70, 90, 106, 126, 146** mètres.

Comme on peut le voir sur la figure9, cela renforce **la corrélation entre les mesures d'EDF et celles de F. Pétrie.**

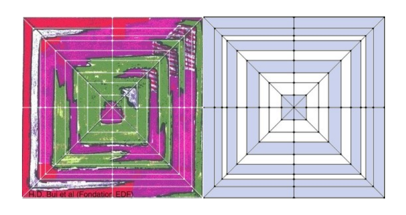


figure9: Comparaison des mesures de micro-gravimétrie et des maximums principaux et points singuliers des mesures de F.P.

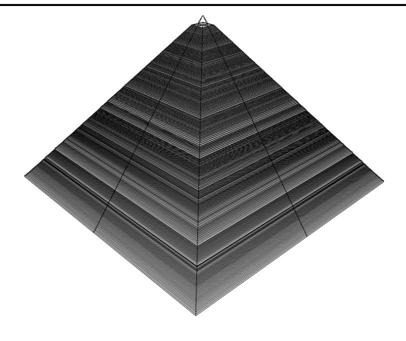


figure10: pyramide reconstituée à partir des mesures de F. Petrie

Exploitation des mesures Laser

Des mesures laser [1] ont permis de mettre en évidence certaines anomalies dans la pyramide de khéops.



figure1: Mesures laser de W. Neubauer

De ces mesures et des anomalies observées (parties marron clair sur fond noir qui représentent des déficits en pierre), **il semble apparaître différents niveaux.** Ce qui reste remarquable c'est qu'en reprenant les niveaux principaux trouvés à partir des mesures de F. Pétrie, ces derniers s'intègrent assez bien avec ceux suggérés par les mesures laser 0, 18, (30), 38, 54, 72, 90, 106, 126, 146m) comme dans la figure2 suivante:

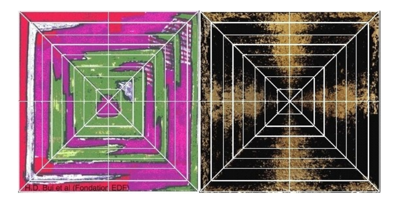


figure2: Mesures EDF et laser avec niveaux principaux

En revanche, si on revient sur la figure2, ce qui reste surprenant dans les "anomalies" laser en marron sur fond

noir, (présentes sur chacune des faces), c'est qu'elles n'aient pas été détectées par les mesures de micro-gravimétrie d'EDF alors cela veut dire qu'il ne peut s'agir que d'un agencement différent des blocs. Pour être plus précis, il s'agit d'un creusement des faces avec une saignée au centre et donnant lieu au phénomène d'apothème. Ce type de configuration géométrique et d'"anomalie" pouvant être visible en journée comme sur l'image suivante.

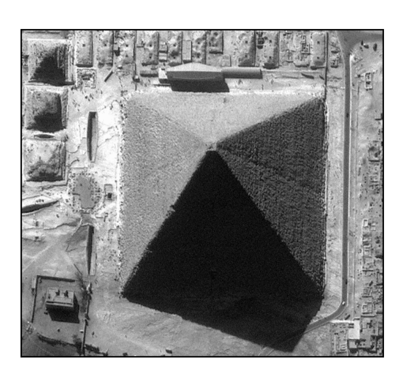


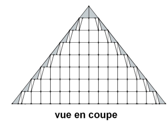
figure3: Photographie aérienne de la pyramide de Khéops

D'après W. Neubauer et al, ces "anomalies", seraient dues à la façon de construire la pyramide ce qui est une conclusion tout à fait pertinente et qui permettrait d'exclure la théorie des rampes entourantes (internes ou pas) au profit des récits d'Hérodote (levage des charges par niveaux). Comme supposé dans un paragraphe suivant "puits semi-ouverts", il semblerait que la pyramide de Khéops ait été construite en même temps par 8 équipes (2 par face, les limites de leurs actions étant définies entre la partie centrale d'une face et ses coins), avec peut être une autre équipe à chaque niveau chargée de lever les blocs sur des traineaux en guise de palettes à l'aide de cordes et de les distribuer soit au niveau supérieur, soit aux équipes latérales

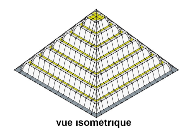
[1] W. Neubauer et al: CIPA 2005 symposium: Combined high resolution laser scanning and photogrammetrical documentation of the pyramids at Giza

Grille de Travail

Les égyptiens ont très certainement utilisé un plan de la pyramide de Khéops avant de la construire. Mais à quelle échelle ont ils travaillé? Pour y répondre, nous allons nous inspirer des travaux de Ole Jorgen Bryn [1], et au lieu de considérer le chiffre 7 comme diviseur 'magique' nous allons utiliser plutôt le chiffre 8 puisque comme on l'a trouvé il y aurait 7 massifs et non 6. La pyramide étant haute de 280 coudées royales (RC) avec une demi-base de 220 coudées royales, divisée par 8 cela fait **une grille faite de rectangles de 27.5RCx35RC** soit 192.5x245 palms (au lieu de 220x280 palms)



vue en coupe



vue isometrique

Les niveaux se précisent donc toutes les 35 coudées royales soit en arrondissant en mètres: 18.3, 36.6, 54.9, 73.2, 91.6, 109.9, 128.2, 146.5m ce qui reste proche de nos résultats (0, 18, (30), 38, 54, 72, 90, 106, 126, 146m). Sur la figure précédente sur une hauteur de 35 coudées royales, la pente du massif est similaire à la pyramide de Meidum, c'est-à-dire avec un rapport 14/11 (35/ 27,5), les flancs reposant sur 10 coudées royales. Les parties blanches de la vue en coupe représentent une éventuelle maçonnerie complémentaire dans le cas où la pyramide aurait subi une transformation comme dans le cas de la pyramide de Mykérinos, mais il n'est pas impossible d'avoir une pyramide parfaite construite par tranches et qui n'aurait subi aucune transformation. Dans ce cas la ligne de pente devrait affleurer la ligne qui relie les nez de marches. Si l'on applique cette grille à ce qui est connu de la pyramide de Kheops, on obtient la figure suivante:

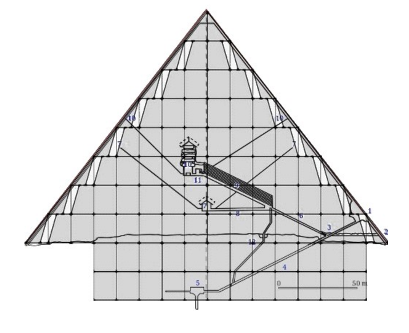


figure5: Vue en coupe de la pyramide avec grille

[1] Retracing Khufu's Great Pyramid.The "diamond matrix" and the number 7

Les poutres de la chambre du roi

Pour monter des pierres de taille moyenne un contrepoids n'est pas nécessaire, ce sont les poutres et chevrons de la chambre du roi qui posent problème car ces pierres peuvent peser jusqu'à 60T. Pour pallier à ce problème J.P. Houdin avait imaginé la fameuse rampe frontale de 350m de longueur et 43m de haut (niveau de la chambre du roi) et utilisé la grande galerie comme passage du contrepoids ce qui aiderait à monter les pierres les plus lourdes. Cette solution bien que logique reste difficile à admettre, car c'est envisager une rampe temporaire gigantesque seulement pour placer des pierres qui resteront invisibles aux yeux de tous. **En revanche, il est plus crédible d'envisager de monter les poutres via une rampe en**

pente forte (26°) qui ferait partie intégrante de la pyramide (figure 1, cas 1)) voire mieux en utilisant un puits passant à proximité de la chambre de la reine (figure 1, cas 2)). Ceci permettrait de monter les poutres au niveau de la chambre du roi. Les poutres pouvant ensuite être élevées verticalement petit à petit durant la construction ou toujours à l'aide de la grande galerie.

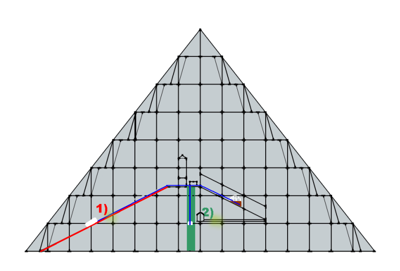


figure1: Grande galerie comme passage de contrepoids dans 2 cas

Dans le cas d'un levage de pierres le long des murs ou par des puits semi-ouverts pour atteindre les massifs 3 et 4 sans utiliser de contrepoids ou machine de levage, il faudrait utiliser 6OT/15=4000 hommes (un homme

pouvant tirer en moyenne 15kgs et occuper 0,75m2) ce qui représente une aire de 3000m2, ou une surface carrée 54m*54m = 104RC*104RC = 3.8cases*3.8cases (la grille de travail horizontale étant de 27.5RC).

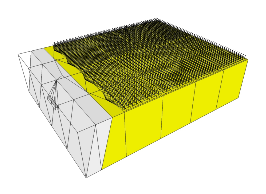


figure2: levage d'une poutre de 60T

Pour lever les poutres entre les massifs 3 et 4, il faut envisager non pas un changement de plan mais **utiliser un ordre de construction des massifs défini à l'avance** pour le passage des poutres de la chambre du roi afin d'utiliser successivement 4 palliers d'au moins 3.8 cases de côté comme sur la figure3:

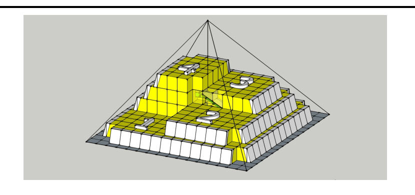


figure3: Massifs 1 à 4

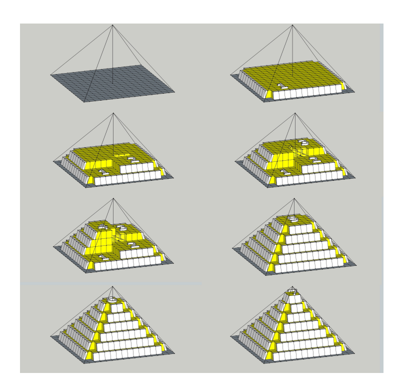


figure4: Etapes de construction des massifs

A titre de comparaison, pour tirer la même poutre le long d'une pente de 12° et 14m de largeur, il faudrait

utiliser un millier d'hommes environ. Ces hommes occuperaient une portion de la pente d'au moins 60m pour un dénivelé de 11m environ comme montré sur la figure6 suivante. Ceci est tout aussi difficile à imaginer que la solution précédente. Dans ce cas, M. Michel propose d'utiliser les rampes supérieures et inférieures et un dispositif dans les coins pour pouvoir tirer la poutre.

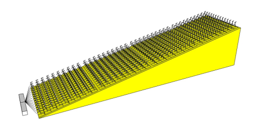


figure5: Tirage de la poutre le long d'une rampe (le point d'attache est symbolique ici)

Transformation finale

La pyramide de Khéops aurait donc d'abord été construite comme une pyramide à degrés dont nous avons pu retrouver les hauteurs de trois manières différentes. Tout comme les autres pyramides, elle aurait dû être construite en tranches avec un noyau central.

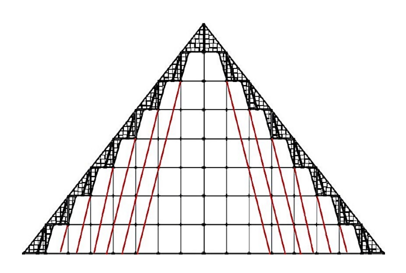


figure1: Structure à degrés en tranches

Quel que soit le type de construction en degrés adopté par les égyptiens, on va supposer que **les pierres des mastabas auraient été levées le long de murs pouvant atteindre 18,3 mètres de hauteur chacun** et qu'il en serait **de même pour passer d'une pyramide à degrés simple (7) à une pyramide à degrés nombreux (203).** Nous ne retiendrons pas la théorie des rampes comme l'imaginent certains (J.P. Houdin, G. Dormion, M. Michel) car il a été vu que pour accéder à des hauteurs importantes, il est plus efficace de lever une charge que de la tirer. **Cela dit une rampe d'accès aurait très bien pu être utilisée pour monter les pierres sur le premier massif**. Une fois les massifs érigés, il va falloir transformer la pyramide à degrés en pyramide à faces lisses en rajoutant une maçonnerie complémentaire faite de blocs de taille variable avant de poser le revêtement final. La géométrie particulière de la pyramide observée lors des mesures laser (les 8 faces) suggère qu'il pourrait y avoir eu au maximum 8 chantiers en même temps pour chacun des 7 niveaux, ce qui fait 56 chantiers possibles. Les mesures de F. Pétrie montrant une répartition des blocs

bien particulière, une diminution de la taille des blocs avec la hauteur par niveau et une décroissance linéaire de la taille des plus gros blocs d'un niveau à un autre, la gestion de l'acheminement des blocs devient très compliquée, ce qui n'exclut pas les 56 chantiers en parallèle mais irait plutôt dans le sens de **travailler par niveau et ce successivement des niveaux supérieurs vers les niveaux inférieurs pour des raisons évidentes d'accessibilité.** Le pyramidion pouvant toutefois être posé à la fin de manière symbolique (l'a t'il été un jour?). Cette conclusion est en accord avec les propos d'Hérodote: *"On commença donc par revêtir et perfectionner le liant de la pyramide ; de là on descendit aux parties voisines, et enfin on passa aux inférieures, et à celles qui touchent la terre."*. Pour passer d'un niveau à un autre de manière rapide on peut imaginer un levage des blocs le long des murs des massifs, mais ce tirage n'a pu s'effectuer de manière anarchique afin de ne pas perturber les chantiers inférieurs et supérieurs en cours. **Le plus simple étant d'imaginer un chemin commun aux niveaux.** Il semblerait logique comme vu précédemment, de penser à partir des

mesures laser (voir figure2), que c'est au milieu des faces (et peut être vers les coins des massifs) que seraient passées toutes les pierres recouvrant la pyramide à degrés. En effet, si ces endroits ont été les derniers avoir été remplis, ils sont devenus difficiles d'accès pour les dernières pierres et cela pourrait expliquer les tranchées centrales observées (en rouge). De même que des pierres entreposées sur les niveaux ont pu être déplacées pour être finalement repositionnées vers la partie centrale des faces ce qui pourrait expliquer le creusement des faces (en jaune et vert)

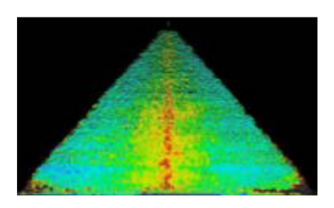


figure2: Résultat laser de W. Neubauer et al

(du moins dense au plus dense, le code des couleurs est le suivant: rouge, jaune, vert, cyan)

La figure3 est un schéma de principe qui ne se soucie pas du système de levage envisagé ou non. Elle montre le cheminement d'un bloc: a) arrivée sur le massif de niveau n-1 et déplacement vers le mur de niveau n, b) levage le long de la paroi du massif de niveau n, c) déplacement éventuel vers le mur de niveau n+1 si ce dernier n'est pas terminé, d) ou déplacement vers le mur construit sur le niveau n pour obtenir une pente à 51°, e) levage le long du mur construit sur le niveau n et positionnement sur cette structure...

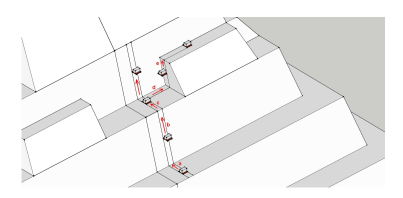


figure3: cheminement d'un bloc

Les systèmes mécaniques utilisés pour le levage d'un bloc de maçonnerie complémentaire d'un niveau à un autre (étape b) ou d'un gradin à un autre (étape e) sont trop spécifiques pour être étudiés ici de mon point de

vue et ont déjà été évoqués dans le paragraphe "Les machines de levage". Oon peut citer F. Löhner et son système de rouleau de corde utilisé sur une pyramide lisse en cours de construction mais ne considérant pas plusieurs massifs superposés (figure4).

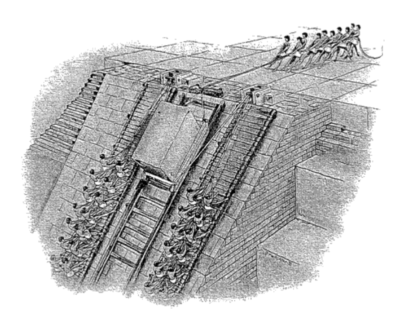


figure4: levage le long d'une face selon F. Löhner

Si on regarde l'évolution des moyens de levage depuis l'antiquité, il est peu probable d'envisager un système mécanique permettant de réduire de beaucoup le nombre d'hommes (100-150) pour lever les blocs d'un massif à l'autre. En revanche, de par

les dimensions raisonnables des systèmes mécaniques imaginés jusqu'à présent (le plus simple étant le levier), il est possible de réduire grandement le nombre d'hommes pour soulever les blocs de maçonnerie complémentaires d'un gradin à un autre, et donc permettre de constituer de nombreuses équipes pour finir plus rapidement la pyramide. Comme dit précédemment, le levage des blocs peut s'effectuer le long des faces en leur milieu ce qui nécessite soit d'avoir des faces lisses en ces endroits pour tirer les charges, soit d'utiliser un monte-charge ou un dispositif mécanique similaire à la chèvre sur les murs des massifs voire des puits semi-ouverts faisant partie intégrante des faces comme symbolisé ici:

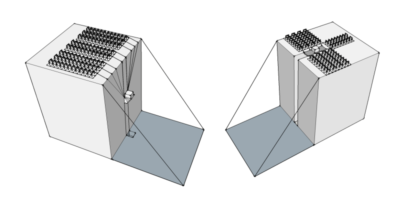


figure5: levage le long d'un mur et par un puits à 3 côtés

Afin de rendre la pyramide lisse, on utilisait des pierres de parement en calcaire, de Tourah selon JP Houdin ou cimenté selon J Davidovitz. La disposition de ces pierres dans l'image suivante montre qu'elles s'appuient sur les pierres de niveau inférieur, mais sont aussi maintenues par les pierres supérieures. C'est sans doute pour cela que le parement du sommet de la pyramide de Kephren est encore visible de nos jours tandis que le parement inférieur a disparu. Dans ces conditions il est difficile de dire si les égyptiens ont commencé la pose de parement en partant du haut ou bien du bas. Si on considère qu'il est périlleux d'œuvrer sur un revêtement de calcaire fragile cela nous amène à penser que les égyptiens travaillaient en partant du haut, d'un autre côté comme il y a peut d'espace pour faire tenir les pierres, les égyptiens auraient dû commencer par le bas. De ces deux contradictions, il ressort que les pierres de parement étaient posées des massifs supérieurs vers les massifs inférieurs, mais en posant les pierres en partant de la base de chaque massif. Ce qui reste conforme avec les propos d'Hérodote: "*On commença donc par revêtir et perfectionner le liant de la pyramide ; de là on descendit aux*

parties voisines, et enfin on passa aux inférieures, et à celles qui touchent la terre.". Pour vérifier cette hypothèse qui se révèle être celle de M. Michel, il faudrait voir si il y a suffisamment d'espace pour poser une pierre de parement sur les pierres situées à la base de chaque massif.

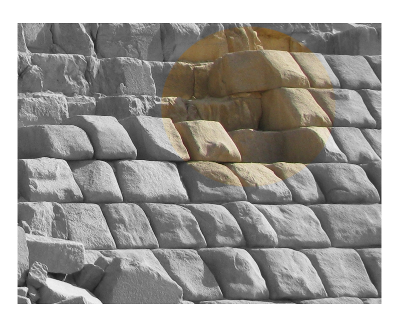


figure5: parement de la pyramide de Kheops

Conclusion

De Hérodote à Houdin, les théories essayant d'expliquer le mystère de la construction de la grande pyramide de Khéops sont très nombreuses et prennent en compte le fait établi par les archéologues que sous l'ancien empire les égyptiens ne connaissaient ni la roue, ni la poulie mobile et encore moins des animaux de trait comme les boeufs. Les égyptiens ne disposant que de leur propre force, de cordes en fibre de palmier doum, de papyrus, de lin ou d'alfa, toujours torsadés, jamais tressés puis en chanvre, de poulies fixes, de bois et d'outils en cuivre pouvant être utilisés comme leviers, ou pour tailler les pierres, etc... C'est bien tout cela qui nous stupéfie lorsqu'on observe ces imposantes pyramides âgées de plusieurs millénaires et dont on rapporte qu'elles auraient été érigées en une vingtaine d'années. C'est donc par des raisonnements simples et avec une approche de

physicien qu'un tri a été fait entre ces différentes théories, afin de savoir quelles méthodes, de levage ou de tractage, seraient les plus pertinentes et sous quelles conditions.

En premier lieu il a été vu que les théories de levage d'une charge plutôt que de son tractage sont les plus légitimes dès lors qu'il s'agit de travailler sur des hauteurs élevées avec beaucoup de travailleurs. Il a ainsi été démontré qu'en tenant compte du nombre de travailleurs et des forces de frottement, envisager des pentes faibles pour monter des charges était basé sur des a priori et que par exemple, préferer une pente de 26° à une pente de 7° permettait un gain de temps de 2.5 fois si l'on considère un coefficient de frottement u à sec de 0.5 (1.9 fois en sol humide sinon car u réduit à 0.2. Une étude intéressante sur les coefficients de frottement réduits par humidification reste celle de A. Fall:Sliding Friction on Wet and Dry Sand). Pour ce type de tractage en pente forte (26°), il serait possible d'emprunter des escaliers latéraux à la rampe. Comme les mesures de F. Pétrie le montrent, il y a des singularités allant jusqu'au niveau de la

chambre du roi qui fait qu'il y a des choses non comprises et que l'on peut tout imaginer comme l'utilisation d'autres rampes à 26° faisant partie de l'édifice comme la grande galerie qui aurait permis de tirer/lever de lourdes poutres de la chambre du roi; Toujours est-il que le cas extrême et le plus avantageux reste celui de pentes proches de 90° correspondant au tractage/levage d'une charge le long d'un puits ou d'un mur et permettant un gain maximum de temps compris entre 2.6 (u=0.2) et 5 (u=0.5) fois par rapport à une pente de 7°.

En deuxième lieu, a été vu qu'on ne pouvait lever directement une charge sur toute la hauteur de la pyramide, **il reste préférable de procéder par étapes avec des niveaux successifs de la pyramide à définir. Dans le cas de la pyramide de Khéops, ces niveaux ou mastabas ont été retrouvés de manière cohérente par 3 méthodes différentes**: l'exploitation des mesures de F. Pétrie, la microgravimétrie EDF, et les mesures laser. Ainsi, il existerait pour la pyramide de Khéops, 8 niveaux principaux d'environ 18 mètres de hauteur

chacun qui définissent de par leur emplacement la pente à 51°. Ces niveaux peuvent être théoriquement reliés pour certains d'entre eux par des rampes latérales de 8° d'inclinaison, mais c'est un résultat géométrique qui ne semble pas correspondre aux mesures laser.

En troisième lieu a été étudié le gain que pouvait représenter la possible utilisation de contrepoids pour ériger les blocs. Ce gain s'étant révélé assez important en terme de ressources, reste difficile à mettre en pratique sans envisager d'effort fractionné comme introduit dans cet ouvrage. Les gains apportés par l'utilisation de contrepoids montrent que les égyptiens auraient dû utiliser cette méthode de contrepoids pour des blocs de plus de 3 tonnes. De nombreux auteurs s'accordant à dire que la grande galerie de Khéops a été utilisée comme passage de contrepoids pour lever les poutres des chambres de décharge.

En quatrième lieu, cet ouvrage, ne s'est pas focalisé sur les machines de levage, alors que ce sont elles qui auraient pu être utilisées pour bâtir

les pyramides, et non les rampes à l'exception peut être de rampes d'accès en pente forte et à définir pour les niveaux les plus bas (entre la chambre de la reine et du roi) où les mesures de F. Pétrie montrent des anomalies. **Une tentative d'explication de passage de pyramide à degrés à une pyramide à faces lisses a néanmoins été avancée** dans le cas de la pyramide de Khéops, en supposant que toutes les pierres recouvrant la pyramide à degrés seraient passées par le milieu des faces et les coins des massifs.

Quant au revêtement final, qui a aujourd'hui presque entièrement disparu, il pourrait avoir été mis en place à partir du haut vers le bas de la pyramide comme rapporté dans les récits d'Hérodote. Pour ce faire les égyptiens utilisaient des pierres de parement mais il n'est pas impossible du tout que ce revêtement ait été réalisé comme une sorte de ciment-calcaire ainsi que rapporté par J. Davidovitz (2005 - The Kheops mystery targeted with neutron); dans ces conditions il n'est pas surprenant qu'il n'ait pas bien résisté au temps.

Pour conclure, les récits d'Hérodote seraient à prendre en compte même si les mots qu'il tient de ses traducteurs restent ambigus. En effet, on ne sait pas ce que signifiait le mot "machine" (faite de bois courts) pour les égyptiens, ni si les "krossais" ou "bomides" désignaient les 203 gradins de la pyramide ou plutôt les massifs d'une pyramide à degrés. Cela dit, en l'absence de véritables preuves, il ne faudrait plus croire uniquement en des théories basées sur des rampes en pente douce ou entourrantes dont celles de M. Michel ou J.P. Houdin, qui pour expliquer de manière cohérente la construction de la pyramide de Khéops a émis certaines hypothèses, une rampe frontale (F. Petrie) qui aurait pourtant pu être contenue dans la diagonale de la pyramide, et qui précède une rampe en tranchée (J. Rousseau), et introduit les rampes internes ou tunnel, proches de la surface mais faisant partie intégrante de la pyramide (G. Dormion). J.P. Houdin s'est basé le premier sur les mesures de microgravimétrie et a retrouvé peut être sans le savoir, et de manière approximative, certains niveaux principaux qu'il ne considère pas comme tels, mais qui peuvent être reliés au niveau

des arêtes par ses rampes entourantes de 8° environ (regarder attentivement en mode zoom la figure2 du paragraphe "Rampe diagonale"). Cela dit, cette particularité n'est peut être seulement qu'un résultat de géométrie parmi tant d'autres (nombre d'or etc). Comme nous l'avons vu, si les égyptiens ont utilisé des rampes pour construire leur pyramide il faudrait les considérer d'abord comme des rampes d'accès, contenues dans la pyramide et avec un angle et une hauteur optimale à définir. Actuellement on ne peut se baser que ce qui est connu, c'est-à-dire pour la pyramide de Khéops, des rampes non entourantes, d'inclinaison voisine de 26° comme celle de la grande galerie.

Post-Scriptum

Cet ouvrage a permis de voir les méthodes employées dans le gros oeuvre de la pyramide de Khéops, qui a d'abord été construite comme une pyramide à degrés et non progressivement comme le pensent certains. Pour ma part, je n'exclus pas l'utilisation de rampes en pentes fortes faisant partie intégrante de la pyramide comme la grande galerie et pouvant être assistées par un puits et je reste partisan d'un levage de charges le long des murs des massifs (figure1) ou par un puits semi-ouvert (figure2) les reliant, mais ce n'est qu'une opinion personnelle invérifiable à ce jour, comme toutes les autres théories. Par ailleurs, il existe un certain nombre de points non résolus, de questions sur l'agencement interne de la pyramide. Ces nombreuses questions ont pour certaines des réponses déjà toutes faites par certains, mais elles mériteraient d'être

étudiées plus en détail dans un autre ouvrage.

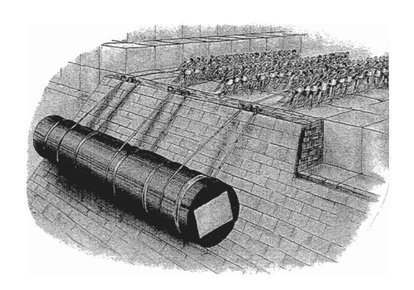


figure1: Levage de charges le long d'un mur

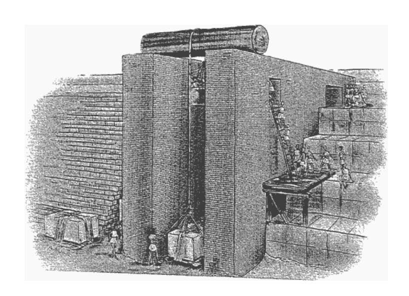


figure2: Levage de charges par un puits semi-ouvert